

УДК 621.396

## Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов

<sup>1</sup> Синицын Е. А., <sup>2</sup> Фридман Л. Б.

<sup>1</sup> Научно-технический центр «Челябинский радиозавод “Полет”», АО ул. Курчатова, д. 9, г. Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация  
*esinit@yandex.ru*

<sup>2</sup> Научно-производственный комплекс «ТИМ», ООО пр. Шаумяна, 4, корп. 1, лит. А, г. Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация  
*Lenya2002@bk.ru*

Получено: 24 декабря 2021 г.

Отрецензировано: 28 декабря 2021 г.

Принято к публикации: 28 декабря 2021 г.

**Аннотация:** Рассмотрены особенности пеленгации воздушных судов путем оценки частоты Доплера, возникающей при периодическом круговом считывании радиосигналов, поступающих от радиостанций воздушных судов на кольцевую антенную решетку автоматического радиопеленгатора. Показаны возможности формирования и измерения частоты Доплера принимаемых радиосигналов, представлены основные исходные данные для построения предлагаемого варианта измерения пеленга воздушных судов с источниками радиоизлучений. Приведены результаты оценки допустимых величин расстояния между соседними элементами и радиуса кольца антенной решетки, а также чувствительности разности фаз и частоты Доплера радиосигналов соседних элементов к изменению направления на источник радиоизлучения.

**Ключевые слова:** автоматический радиопеленгатор, воздушное судно, доплеровский фильтр, источник радиоизлучения, когерентное накопление, пеленг, радиосигнал, станция радиосвязи, частота Доплера.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Синицын Е. А., Фридман Л. Б. Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 3. С. 194—208.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Синицын, Е. А. Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов / Е. А. Синицын, Л. Б. Фридман // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 194—208.

# Aircraft Direction Finding by Estimating the Doppler Frequency of Received Radio Signals

E. A. Sinitsyn<sup>1</sup> and L. B. Friedman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Scientific and Technical Center of Chelyabinsk Radio Plant “Polyot”, JSC,  
Kurchatov str., 9, St.-Petersburg, 194223, Russian Federation  
esinit@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Scientific and Production Complex “TIM”, LLC,  
Shahumyan Ave., 4, build. 1, lit. A, St.-Petersburg, 195027, Russian Federation  
Lenya2002@bk.ru*

Received: December 24, 2021

Peer-reviewed: December 28, 2021

Accepted: December 28, 2021

**Abstract:** *The features of aircraft direction finding are considered by estimating the Doppler frequency that occurs during periodic circular reading of radio signals coming from aircraft radio stations to the annular antenna array of an automatic direction finder. The possibilities of forming and measuring the Doppler frequency of received radio signals are shown, the basic initial data for constructing the proposed variant of measuring the bearing of aircraft with radio emission sources are presented. The results of estimating the permissible values of the distance between neighboring elements and the radius of the antenna array ring, as well as the sensitivity of the phase difference and the Doppler frequency of the radio signals of neighboring elements to a change in direction to the radio source are presented.*

**Keywords:** *automatic direction finder, aircraft, Doppler filter, radio emission source, coherent accumulation, bearing, radio signal, radio communication station, Doppler frequency.*

**For citation (IEEE):** E. A. Sinitsyn et al. “Aircraft Direction Finding by Estimating the Doppler Frequency of Received Radio Signals,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 194–208, 2021. (In Russ.).

## 1. Введение

На гражданских и государственных аэродромах РФ и за рубежом для оперативной оценки направления движения воздушных судов (ВС) широко используются автоматические радиопеленгаторы (АРП)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Федеральные авиационные правила. Радиотехническое обеспечение полетов и авиационная электросвязь. Сертификационные требования. М.: 1999 г. <https://docload.ru/Basesdoc/6/6495/index.htm>

При помощи АРП определяется угол в горизонтальной плоскости между направлением расположения ВС в воздушном пространстве и направлением на магнитный Север относительно точки стояния АРП (пеленг ВС). Пеленг ВС оценивается путем радиопеленгации источников радиоизлучения (ИРИ), установленных на ВС и излучающих радиосигналы в диапазоне ультракоротких волн (УКВ), приемными каналами АРП.

Существующие автоматические радиопеленгаторы обеспечивают измерение пеленга ВС, оборудованных станциями радиосвязи (СР), работающих в диапазонах УКВ 100—150 МГц и 220—400 МГц<sup>2</sup>.

Пеленги ВС, измеренные АРП, отображаются на индикаторе кругового обзора комплекса средств руководства полетами (КСРП), находящегося на рабочем месте (РМ) руководителя полетов на командном диспетчерском пункте (КДП) аэродрома. Величины пеленгов ВС диспетчером или руководителем полетов передаются с КДП аэродрома на борт соответствующих ВС при помощи средств радиосвязи РМ КСРП КДП<sup>3</sup>.

В основу принципа действия наиболее широко распространенных АРП положен прием радиосигналов, излучаемых бортовыми СР ВС, на элементы (вibrаторы) антенны, имеющие ненаправленные свойства в горизонтальной плоскости и расположенные по кольцу и в центре антенны АРП, с последующим анализом фазовых соотношений принятых сигналов [1]. Анализ фазовых соотношений принятых сигналов в АРП может выполняться, например, путем реализации корреляционного интерферометра. Основной недостаток такого подхода — возможная неоднозначность оценки фаз, низкая помехоустойчивость, а также обычно невысокая точность измерения величины пеленга.

В работе предлагается выполнять однозначную точную радиопеленгацию ВС, оборудованных СР, путем оценки частоты Доплера, возникающей при быстром периодическом круговом считывании сигналов, принимаемых ненаправленными элементами кольцевой антенной решетки, без необходимости использования центрального элемента.

## 2. Основные исходные данные

Предлагаемый вариант измерения пеленга ВС основан на оценке частоты Доплера сигнала ИРИ, принимаемого элементами приемной антенны АРП, возникающей вследствие двух причин:

---

<sup>2</sup> DF2000. Автоматический радиопеленгатор. [https://img.artlebedev.ru/everything/azimut/booklets/DF2000\\_rus.pdf](https://img.artlebedev.ru/everything/azimut/booklets/DF2000_rus.pdf)

<sup>3</sup> Авиационные правила. Часть 170. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс (АП-170). Том II. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс. 3-е изд., 2013. 216 с.

— наличие разности фаз между сигналами, излучаемыми удаленным ИРИ и принятыми в двух разнесенных точках пространства, в частности, разности фаз  $\Delta\varphi$  между двумя соседними элементами кольцевой антенной решетки АРП;

— переключение принимаемых сигналов в ходе кругового циклического дискретного опроса выходов элементами с круговой скоростью вращения  $\Omega$  обор/с и периодом полного оборота  $T_0 = 1$  обор/ $\Omega$ .

Исходные данные для предлагаемого варианта измерения пеленга определяются следующими основными типовыми требованиями, предъявляемыми к АРП<sup>1,3</sup>:

— измерение пеленга на ИРИ ВС должно выполняться в пределах от 0 до 360° в горизонтальной плоскости и от 0 до ~45° в вертикальной плоскости;

— среднеквадратическая ошибка (СКО), характеризующая погрешность измерения пеленга  $\beta$  ВС, должна быть не более  $\delta_\beta = 1^\circ$ .

Основные исходные данные:

а) Вид антенны АРП — типовая кольцевая антенная решетка с  $N$  приемными антенными элементами, например, вертикальными вибраторами  $B_i$  ( $i = 1 \div N$ ), которая имеет радиус  $R$  и может не содержать центральный элемент (рисунок 1).

Обычно количество приемных антенных элементов выбирается в пределах  $N = 9 \div 16$ .

Выходные сигналы  $N$  антенных элементов подаются на  $N$  приемных каналов или через высокочастотный (ВЧ) антенный коммутатор на один приемный канал аппаратуры АРП (рисунок 1).

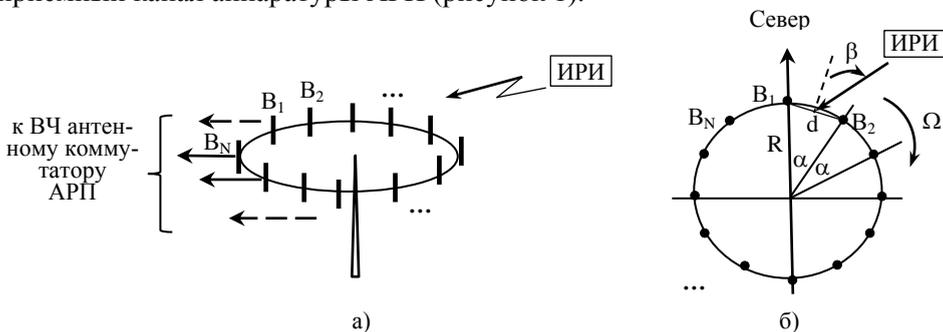


Рис. 1. Типовая приемная кольцевая антенная решетка автоматического радиопеленгатора ( $\beta$  — угол между нормалью к базе первых двух элементов антенны и направлением на источник радиоизлучения).

Fig. 1. A typical receiving ring antenna array of an automatic direction finder ( $\beta$  is the angle between the normal to the base of the first two elements of the antenna and the direction to the source of radio emission)

б) Минимальная длина волны:

—  $\lambda_1 = 2$  м — для 1-го УКВ диапазона частот 100—150 МГц;

—  $\lambda_2 = 0,75$  м — для 2-го УКВ диапазона частот 220—400 МГц.

в) Типовое количество элементов  $N = 9—16$ . Примем

$$N = 12.$$

г) Угол в горизонтальной плоскости между направлениями из центра окружности на границы элементов антенны

$$\alpha = 360^\circ/N.$$

При  $N = 12$  получим

$$\alpha = 360/12 = 30^\circ.$$

д) Угловая скорость вращения  $\Omega$  последовательного считывания выходных сигналов элементов антенны.

Величина  $\Omega$  и соответствующий ей период  $T_0$  одного полного оборота считывания всех сигналов  $N$  элементов антенны выбираются с учетом:

— минимального допустимого периода считывания (выборки)  $T_{СЧ}$  ВЧ сигналов соседних элементов антенны, примем для количественного примера  $T_{СЧ} = 70$  мкс;

— минимального возможного времени (быстродействия)  $T_K$  переключения выходных ВЧ сигналов  $N$  элементов в антенном коммутаторе, устанавливаемом на выходе антенны и предназначенном для использования одного канала приема и последовательной обработки сигналов от  $N$  элементов. Полагаем  $T_K = 10$  мкс.

Минимальный период одного полного оборота при считывании сигналов  $N$  элементов антенны определим по выражению

$$T_{0\min} = (T_{СЧ} + T_K) \times N. \quad (1)$$

Из выражения (1) для  $T_{СЧ} = 70$  мкс,  $T_K = 10$  мкс и  $N = 12$  получим

$$T_{0\min} = 960 \text{ мкс}. \quad (2)$$

Вводя для величины  $T_{0\min}$  некоторый запас по времени, с учетом выражения (2) можно принять

$$T_0 = 1000 \text{ мкс} = 1 \text{ мс}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует значение для скорости вращения последовательного считывания выходных сигналов элементов антенны

$$\Omega = 1/T_0 = 1000 \text{ обор/с}.$$

Величины  $\Omega$  и  $T_0$  уточняются в зависимости от количества элементов антенны и выборок сигналов  $N$ , а также времени последующей обработки, выполняемой в приемном канале АРП.

С целью использования для радиопеленгации ИРИ в качестве информационного признака частоты Доплера, а также повышения энергетического потенциала АРП по обнаружению ВС путем когерентного накопления (КН) выборок принимаемых сигналов, в приемном канале АРП целесообразно обеспечить параллельную обработку принимаемых сигналов в наборе узкополосных доплеровских фильтров (ДФ). Характер относительного изменения частоты Доплера сигналов, попадающих в ДФ элементов антенны, позволяет дополнительно оценить направление перемещения ВС.

Отметим, что благодаря КН  $N$  выборок пакета принимаемых сигналов энергетический потенциал АРП можно увеличить в  $N$  раз.

### **3. Оценка величины допустимого расстояния между соседними элементами и радиуса кольца антенны**

Расстояние между соседними элементами, расположенными на кольце антенны, определяется радиусом  $R$  кольца антенны и величиной угла  $\alpha$

$$d = 2R\sin(\alpha/2) = 2R\sin(180^\circ/N). \quad (4)$$

При  $N = 12$  согласно выражению (4) получим

$$d = 2R\sin 15^\circ = \sim 0,52R. \quad (4')$$

С целью обеспечения корректной оценки пеленга ИРИ расстояние  $d$  между соседними элементами антенны должно быть таким, чтобы разность фаз  $\Delta\varphi$  между сигналами двух соседних элементов определялась однозначно. Для выполнения этого условия величина  $\Delta\varphi$  должна находиться при любых направлениях расположения ИРИ, соответствующих изменению угла  $\beta = -180 \div 180^\circ$ , в пределах

$$\begin{aligned} -\pi < \Delta\varphi < \pi, \\ -\pi < 2\pi \times d \times \sin\beta / \lambda < \pi. \end{aligned} \quad (5)$$

В диапазоне углов  $\beta = -180 \div 180^\circ$  величина  $\Delta\varphi$  принимает максимальное значение для углов  $\beta=90$  или  $\beta=-90^\circ$ . Выражение (5) при  $\beta = 90$  или  $\beta = -90^\circ$  можно записать в виде

$$2\pi d / \lambda < \pi. \quad (6)$$

Из выражения (6) определим требование к величине  $d$

$$d < \lambda/2. \quad (7)$$

Из выражения (4) с учетом условия (7) определим требование к максимально допустимой величине  $R$

$$2R \times \sin(180^\circ/N) < \lambda/2,$$

из которого получим ограничение на величину радиуса кольца антенны

$$R < (\lambda/4)/\sin(180^\circ/N). \quad (8)$$

Из выражения (8) при  $N = 12$  и  $\lambda_1 = 2$  м для первого УКВ диапазона АРП получим условие

$$R_1 < 0,5/\sin 15^\circ = 1,94 \text{ м}. \quad (9')$$

С учетом требования (9') примем для первого УКВ диапазона АРП

$$R_1 = 1,8 \text{ м}. \quad (9)$$

Из выражения (8) при  $N = 12$  и  $\lambda_2 = 0,75$  м для второго УКВ диапазона АРП получим условие

$$R_2 < 0,1875/\sin 15^\circ = 0,485 \text{ м} \quad (10')$$

С учетом требования (10') примем для второго УКВ диапазона АРП

$$R_2 = 0,45 \text{ м}. \quad (10)$$

Для величин (4'), (9) и (10) при  $N = 12$  определим значения максимально допустимого расстояния  $d$  между элементами антенны для первого и второго УКВ диапазонов частот АРП соответственно

$$d_1 = 0,52 \times 1,8 = \sim 0,94 \text{ м}, \quad (11)$$

$$d_2 = 0,52 \times 0,485 = \sim 0,25 \text{ м}. \quad (12)$$

#### **4. Чувствительность разности фаз сигналов соседних элементов антенны к изменению направления ИРИ**

С учетом ограничений, установленных в пп. 1 и 2, оценим требуемую чувствительность измерительного канала АРП в части изменения разности фаз между сигналами соседних элементов к изменению угла при различных направлениях ИРИ.

Как следует из выражения (5), разность фаз между последовательными выборками сигналов двух соседних элементов антенны определяется выражением

$$\Delta\varphi = 2\pi \times d \times \sin\beta / \lambda. \quad (13)$$

Из выражения (13) определим крутизну зависимости  $\Delta\varphi$  от угла  $\beta$  по выражению

$$\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial\beta} = 2\pi \times d \times \cos\beta / \lambda. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует:

— величина изменения  $\Delta\varphi$  при одном и том же изменении величины угла  $\beta$  зависит от текущей величины угла  $\beta$ ;

— максимальная чувствительность  $\Delta\varphi$  к изменению угла  $\beta$  (крутизна) соответствует углам  $\beta = 0$  и  $\beta = \pm 180^\circ$ ;

— минимальная чувствительность  $\Delta\varphi$ , близкая к нулю, к изменению угла  $\beta$  соответствует углам  $\beta = -90$  и  $\beta = 90^\circ$ .

Оценим максимальное изменение величины  $\Delta\varphi$  в случае минимального изменения угла  $\beta$ , соответствующего допустимой погрешности измерения пеленга  $\delta_\beta = 1^\circ$  град., с использованием выражения (13) при  $\beta = 0$ , например, для случая 2-го УКВ диапазона частот АРП при  $d_2 = 0,25$  м (12)

$$\Delta\varphi = 2\pi \times d \times \sin(\beta + \delta_\beta) / \lambda = 2\pi \times 0,25 \times \sin(0 + 1^\circ) / 0,75 = 2\pi \times 0,017 / 3 = \sim 0,035 = \sim 2^\circ. \quad (15)$$

Как следует из выражения (15), изменение  $\Delta\varphi$  мало даже в случае максимальной крутизны зависимости  $\Delta\varphi$  от угла  $\beta$ .

Можно показать, что такое же малое изменение фазы будет наблюдаться при минимальном изменении угла  $\beta$ , равном  $\delta_\alpha = 1^\circ$ , для случая первого УКВ диапазона частот АРП при  $d_1 = 0,94$  (11).

Таким образом, даже при максимальной чувствительности  $\Delta\varphi$  к изменению угла  $\beta$  (при  $\beta = 0$ ) при малых изменениях  $\beta$  изменение  $\Delta\varphi$  крайне мало.

При минимальной чувствительности  $\Delta\varphi$  к изменению угла  $\beta$  (при  $\beta = \pm 90^\circ$ ) при таких же малых изменениях  $\beta = 1^\circ$  изменение  $\Delta\varphi$  будет еще меньше.

Измерить и провести разрешение таких малых изменений  $\Delta\varphi$  для точной оценки пеленга ВС с ИРИ практически невозможно.

Поэтому использование чисто фазового метода для точного измерения пеленга ИРИ путем оценки изменений разности фаз между сигналами соседних элементов, а также между сигналами разнесенных по кольцу крайних элементов, в зависимости от направления расположения ИРИ, практически невозможно.

## 5. Чувствительность частоты Доплера сигналов соседних элементов к изменению направления ИРИ

С учетом результатов п. 2 оценим чувствительность измерительного канала АРП в части изменения частоты Доплера сигналов соседних элементов к различным изменениям направления ИРИ.

Частота Доплера  $F_d$  сигнала элемента относительно сигнала соседнего элемента возникает при наличии фазового сдвига между сигналами элементов, выборки которых снимаются через интервалы времени, соответствующие периоду одного оборота  $T_0$ , и определяется с учетом (13) выражением

$$F_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Delta \varphi}{\partial t} \Big|_{\partial t = T_0} = \frac{1}{2\pi} \left[ 2\pi \times d \times \frac{\sin \beta}{\lambda} \right] / T_0. \quad (16)$$

Отметим, что величина частоты  $F_d$  в приемных каналах АРП между соседними элементами антенны, в отличие от классической частоты Доплера, не зависит от радиальной скорости движения ИРИ и определяется, как отмечено в п. 1, только величиной  $\Delta \varphi$ , зависящей от параметров  $d$ ,  $\beta$  и  $\lambda$ , и величиной  $T_0$ .

В случае минимального изменения угла  $\beta$ , соответствующего допустимой погрешности измерения пеленга  $\delta_\alpha = 1^\circ$ , для второго УКВ диапазона частот АРП при  $d_2 = 0,25$  м с учетом минимальной разности фаз  $\Delta \varphi_{\min} = 0,035 = 2^\circ$  (15) для  $T_0 = 1$  мс (п. 1) получим требуемый шаг (дискрет) оценки частоты Доплера, который не должен быть превышен:

$$\Delta F_d = \frac{1}{2\pi} \Delta \varphi_{\min} / T_0 = \frac{1}{2\pi} 0,35 / 10^{-3} = \sim 55 \text{ Гц}. \quad (17)$$

В ситуации, когда базы соседних элементов антенны будут находиться в плоскости электромагнитной волны, идущей от ИРИ, получим минимальную величину частоты Доплера

$$F_{d_{\min}} = 0 \text{ Гц}. \quad (18)$$

Максимальное изменение разности фаз между соседними элементами определяется выражением (13) при величине  $\beta = -90$  или  $\beta = 90^\circ$ .

Для  $\beta = 90^\circ$  согласно (13) при расстоянии  $d$  меньшем, но близком к  $\lambda/2$ , получим максимально возможное однозначное изменение фазы между соседними элементами

$$\Delta \varphi_{\max} = 2\pi \times d \times \sin \beta / \lambda \Big|_{\beta = 90^\circ} = \sim \pi. \quad (19)$$

При  $\beta = 90^\circ$  для второго УКВ диапазона частот АРП и  $d_2 = 0,25$  м с учетом максимальной разности фаз  $\Delta \varphi_{\max} = \pi$  (19) для  $T_0 = 1$  мс (п. 1) получим

$$F_{D_{max}} = \frac{1}{2\pi} \Delta\varphi_{max} / T_0 = \frac{1}{2\pi} \pi / 10^{-3} = 500 \text{ Гц.} \quad (20)$$

Из выражений (18) и (20) следует, что измерение пеленга (произвольного угла  $\beta$ ) на ИРИ можно выполнить путем измерения частоты Доплера, находящейся для рассмотренного случая в пределах

$$F_{D_{min}} \div F_{D_{max}} = 0 \div 500 \text{ Гц.}$$

Отметим, что точное (СКО не более  $1^\circ$ ) измерение пеленга на ИРИ можно выполнить с дискретным шагом не более 55 Гц (17) путем измерения частоты Доплера при использовании, например, набора узкополосных доплеровских фильтров с полосой пропускания каждого не более  $\Delta f = \Delta F_D = 55 \text{ Гц}$ .

## 6. Оценка частоты Доплера и соответствующего пеленга (угла $\beta$ ) на ИРИ

Для оценки частоты Доплера с учетом знака в пределах от минус  $F_{D_{max}}$  до  $+F_{D_{max}}$ , т. е. для рассматриваемого случая от минус 500 Гц до +500 Гц, и соответствующего пеленга (угла  $\beta$ ) на ИРИ можно рекомендовать реализацию обработки выборок сигнала при помощи алгоритма дискретного преобразования Фурье (ДПФ), имеющего частоту выборок (дискретизации)  $F_B$  сигнала с каждого элемента не менее чем  $2F_{D_{max}} = 1.000 \text{ Гц}$ .

Для предельного случая минимальной частоты выборок можно считать

$$F_B = 1.000 \text{ Гц,}$$

что соответствует периоду оборота  $T_0 = 1 \text{ мс}$  и  $\Omega = 1.000 \text{ оборот/с}$ .

Точная оценка частоты Доплера (угла  $\beta$  с погрешностью  $\sim 1^\circ$ ) возможна при реализации в ДПФ набора узкополосных доплеровских фильтров с полосой пропускания не более  $\Delta f = \Delta F_D = 55 \text{ Гц}$ .

Примем  $\Delta f = 50 \text{ Гц}$ .

Тогда количество узкополосных фильтров ДПФ должно быть не менее

$$K = F_B / \Delta f = 1.000 / 50 = 20.$$

При величине  $K = 20$  ДПФ имеет 20-й порядок.

Для реализации ДПФ 20-го порядка необходимое количество выборок сигнала с каждого элемента относительно соседнего должно быть  $K = 20$ .

Время, необходимое получения и обработки  $K = 20$  выборок сигнала с каждого элемента относительно соседнего, должно быть

$$T_H = T_0 \times K = 1 \text{ мс} \times 20 = 20 \text{ мс.}$$

Отметим:

— точность пеленгования путем оценки частоты Доплера принимаемых сигналов может быть существенно увеличена посредством повышения круговой скорости вращения  $\Omega$  опроса элементов (уменьшения  $T_0$ ), увеличения порядка ДПФ и времени наблюдения  $T_H$ , позволяющих уменьшить величину  $\Delta f$  фильтров ДПФ;

— за время  $T_H = 20$  мс ИРИ, перемещающийся с максимальной скоростью  $V_{\max} = 300$  м/с в поперечном направлении относительно АРП, критичном для точной оценки пеленга, переместится на расстояние не более

$$S = V_{\max} \times T_H = 300 \times 20 \times 10^{-3} = 6 \text{ м.}$$

Величина  $S = 6$  м практически не скажется на ухудшении точности оценки пеленга ИРИ даже на близких удалениях ВС с ИРИ относительно АРП.

## 7. Структурная схема канала приема сигналов, оценки частоты Доплера и измерения пеленга (угла $\beta$ ) на ИРИ

С учетом изложенного для оценки пеленга ИРИ предлагается структурная схема АРП, основанная на измерении частоты Доплера выборки сигнала ИРИ, снимаемых с соседних элементов антенны АРП (рисунок 2).

АРП состоит из антенны и аппаратного блока (рисунок 2а). Приемный модуль антенны помимо кольцевой антенной решетки с элементами  $V_1 \div V_N$  и ВЧ коммутатора содержит стандартный набор устройств: полосовой фильтр, малошумящий усилитель (МШУ), приемник, цифровой фазовый детектор (рисунок 2б).

Особенность построения модуля цифровой обработки сигналов (ЦОС) аппаратного блока АРП состоит в использовании набора делителей комплексных огибающих сигналов пар соседних элементов  $S_2/S_1, S_3/S_2, \dots, S_N/S_{N-1}, S_1/S_N$  для оценки текущих величин разности фаз между соседними элементами  $\Delta\varphi_{2-1}, \Delta\varphi_{3-2}, \dots, \Delta\varphi_{N-(N-1)}, \Delta\varphi_{1-N}$  и соответствующих модулей ДПФ  $K$ -го порядка для измерения частоты Доплера (рисунок 2в).

Каждый модуль ДПФ  $K$ -го порядка эквивалентен набору  $K$  параллельно включенных доплеровских фильтров, имеющих  $K$  выходов, полосу пропускания  $\Delta f$  и перекрывающих диапазон частот от минус  $F_{д\max}$  до  $+F_{д\max}$ .

В модулях обнаружения и оценки пеленга (всего  $N$  модулей), подключенных к  $K$  выходам ДФ модулей ДПФ, выполняется обнаружение сигнала. По номеру ДФ, где обнаруживается сигнал, принимается решение о величине частоты Доплера и соответственно угла  $\beta$  относительно нормали к базе раскрыва каждой пары соседних элементов.

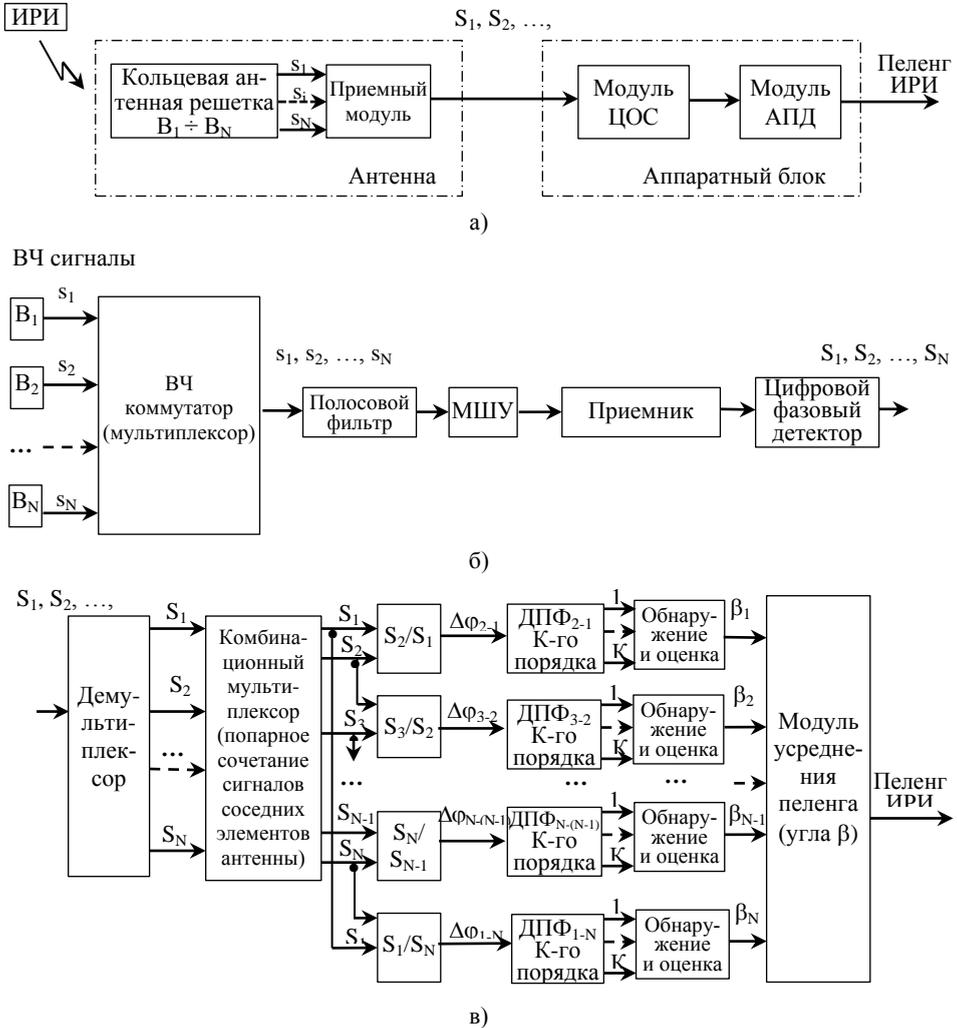


Рис. 2. Автоматический радиопеленгатор:

а) блок-схема автоматического радиопеленгатора; б) структурная схема антенны автоматического радиопеленгатора; в) структурная схема модуля цифровой обработки сигналов аппаратного блока автоматического радиопеленгатора (цепи управления, синхронизации и опорных колебаний не показаны).

Fig. 2. Automatic radio direction finder:

а) block diagram of an automatic radio direction finder; б) block diagram of the automatic radio direction finder antenna; в) block diagram of the digital signal processing module of the hardware unit of the automatic radio direction finder (control, synchronization and reference circuits are not shown)

Решение о величине пеленга ВС с ИРИ принимается с учетом известной ориентации нормалей баз набора пар соседних элементов относительно Севера.

Усредненное значение пеленга ИРИ, сглаживающее случайные ошибки измерений, вырабатывается в модуле усреднения пеленга по частным значениям пеленгов одного и того же ИРИ, оцененным в  $N$  каналах обнаружения и оценки пеленга, по выражению

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i. \quad (21)$$

При совместной обработке согласно выражению (21), реализующей метод повышения точности, основанный на информационной избыточности (Приложение 1), обеспечивается более точный результат оценки пеленга, чем одной парой соседних элементов антенны АРП.

## 8. Заключение

1. Для измерения пеленга воздушных судов с источником радиоизлучений УКВ диапазона целесообразно проводить оценку частоты Доплера выборки сигналов, принимаемых соседними элементами антенны АРП, разнесенных на расстояние меньше половины длины волны и расположенных в кольцевой антенной решетке с диаметром, который может быть больше длины волны радиоизлучений.

2. При выполнении условия расположения элементов антенны (п. 1) разность фаз выборки принимаемых сигналов соседних элементов антенны для произвольной величины пеленга ВС является однозначной величиной. При этом обеспечивается однозначная оценка частоты Доплера (с учетом знака) выборки сигналов и величины пеленга ВС.

3. Точность пеленгования ВС с ИРИ по изменению разности фаз выборки сигнала соседних элементов является низкой.

4. Повышенную точность пеленгования ВС с ИРИ целесообразно получать путем оценки частоты Доплера, оцениваемой по разности фаз выборки сигналов соседних элементов за время одного оборота опроса с использованием процедуры ДПФ.

5. С целью повышения точности пеленгования ВС с ИРИ целесообразно повышать частоту опроса элементов антенны и соответственно частоту Доплера путем увеличения угловой скорости вращения опроса элементов.

6. Увеличение количества элементов антенны позволяет, используя совокупность независимых измерений пеленгов при помощи пар соседних элементов, получить более точный результат оценки пеленга ВС с ИРИ.

Например, при 12 элементах, расположенных в пределах апертуры антенны, получается набор из 12 пар измерителей, которые при совместной обработке благодаря применению метода повышения точности, основанного на информационной структурной избыточности [2, 3], обеспечат уменьшение погрешности оценки пеленга в  $\sim 12$  раз по сравнению со случаем, когда используется одна пара соседних элементов антенны (Приложение 1).

## Приложение 1

Для повышения точности оценки пеленга в АРП предлагается воспользоваться одним из известных методов повышения точности измерений.

Методом повышения точности измерений может служить известный метод использования информационной структурной избыточности [2, 3]. Под информационной избыточностью понимают такое состояние измерительной информации, получаемой в процессе измерений параметра, при котором ее объем формально превышает количество информации, необходимое для суждения о состоянии параметра.

Под структурной информационной избыточностью принято понимать включение в измерительную систему дополнительных средств измерений (СИ), измеряющих одну и ту же физическую величину. Сущность рассматриваемого метода выявляется на примере выполнения 12 измерений одной и той же величины  $N = 12$  однотипными СИ (для случая АРП на базе 12 пар соседних элементов), причем в погрешности измерений доминирует систематическая или случайная составляющие, для которых установлены допускаемые граничные значения.

Пусть результаты измерений величины  $x$  оказались равными

$$x_1, x_2, \dots, x_{11}, x_{12},$$

а неизвестные погрешности 12 СИ (пар элементов) равны соответственно

$$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{11}, \Delta x_{12}.$$

Тогда для среднего из  $N = 12$  результатов измерений величины  $x$  можно записать:

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^{N=12} x_i) / 12 = x + (\sum_{i=1}^{N=12} \Delta x_i) / 12,$$

где  $x$  — истинное значение физической величины,

$x_i = x + \Delta x_i$  — значение величины  $x$ , измеренное  $i$ -м СИ с погрешностью  $\Delta x_i$ .

Отсюда видно, что в зависимости от абсолютной величины, распределения и знака погрешностей  $\Delta x_i$ , средний результат будет характеризоваться значительно меньшей погрешностью (в  $\sim 12$  раз), чем каждый из результатов  $x_1, x_2, \dots, x_{11}, x_{12}$ .

Этот вывод справедлив, если погрешности всей совокупности СИ данного типа можно рассматривать как случайные величины с тем или иным распределением плотностей вероятностей (например, с равномерным распределением).

## Список литературы

1. Саидов А. С., Тагилаев А. Р., Алиев Н. М., Асланов Г. К. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. М. : Радио и связь, 1997. 160 с.
2. Брюханов В. А. Методы повышения точности измерений в промышленности. М. : Изд-во стандартов, 1991. 108 с.
3. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М. : Журнал «Надежность», 2016. 546 с.

### **Информация об авторах**

**Синицын Евгений Александрович**, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Научно-технического центра (СПб) по научно-исследовательской работе АО «Челябинский радиозавод “Полет”», Санкт-Петербург, Челябинск.

**Фридман Леонид Борисович**, доктор технических наук, главный специалист ООО «Научно-производственный комплекс «Технологии, инвестиции, менеджмент», Санкт-Петербург.

### **Information about the authors**

**Evgeny A. Sinitsyn**, Dr. Sci., Prof., Deputy Head of the Scientific and Technical Center (St. Petersburg) for research work of Chelyabinsk Radio Plant “Flight” JSC, St.-Petersburg, Chelyabinsk.

**Leonid B. Fridman**, Dr. Sci., Chief specialist of Scientific and Production Complex “Technologies, Investments, Management”, LLC, St.-Petersburg.